

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra ochrany životního prostředí v průmyslu

Bakalářská práce

Pinch analýza provozu koksochemie

Pinch analysis of coke oven by-product plant

Student:

Lenka Šimková

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Marek Večeř, Ph.D.

2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra ochrany životního prostředí v průmyslu

Zadání bakalářské práce

Student: **Lenka Šimková**

Studijní program: B3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: 2805R001 Chemie a technologie ochrany prostředí

Téma: **Pinch analýza provozu koksochemie**
Pinch Analysis of Coke Oven By-product Plant

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Osnova:

- Literární rešerše na téma: Pinch analýza a .
- Experimentální práce: Sledování provozních parametrů v reálném provozu:
 1. průtoky a teploty procesních proudů
 2. kapacity teplosměnných zařízení a účinnost jejich využití
- Výpočet důležitých transportních vlastností směsných procesních proudů (měrná tepelná kapacita, viskozita, hustota, atp.)
- Provedení modelové Pinch analýzy
- návrhový výpočet relevantních výměníků tepla (teplosměnná plocha, koeficient prostupu tepla, geometrie, atp.)

Popis:

Práce bude zaměřena na provedení materiálové a energetické bilance koksochemické technologie provozované v areálu ArcelorMittal Ostrava. Na základě výsledků bilance s využitím metodiky Pinch analýzy se prověří vytipována místa úspor energie na sledovaném provozu.

Student bude seznámen s technologií výroby koksu a následného zpracování vedlejších produktů v chemické části koksovny. Bude sledovat a zpracovávat trendy klíčových veličin využitelných pro materiálovou a energetickou bilanci technologie. Díky působení v reálném provozním prostředí student získá praktické zkušenosti a odborné znalosti, které bude moci bezpochyby uplatnit v dalším studiu či budoucím povolání.

Tato bakalářská práce bude probíhat ve spolupráci se společností ArcelorMittal Ostrava a některé její části mohou být neveřejné s ohledem na předmět duševního vlastnictví firmy.

Seznam doporučené odborné literatury:

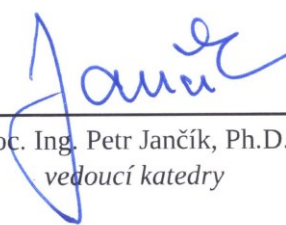
1. Perry, R. H. and D. W. Green (2008). Perry's chemical engineers' handbook. New York, McGraw-Hill.
2. Bejan A., A. D. Kraus, et al. (2003). Heat transfer handbook. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
3. Dimian, A.C. (2003). Integrated design and simulation of chemical processes. Amsterdam; Boston, Elsevier.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Marek Večeř, Ph.D.**

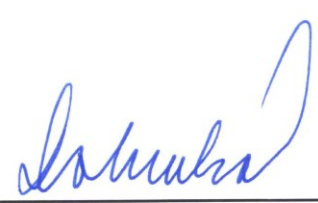
Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 30.04.2015



doc. Ing. Petr Jančík, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na

ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

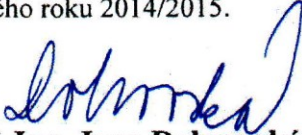
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2014/2015.

Ostrava 4. 11. 2014


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 14.5.2015

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

LENKA ŠIMKOVÁ

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Marku Večeřovi Ph.D. za ochotu, věnovaný čas a cenné rady při psaní této práce. Dále panu Ing. Radku Tomanovi a Ing. Pavlu Baranovi ze společnosti ArcelorMittal Ostrava a.s. za detailní popsání postupu koksování včetně možných prohlídek technologie.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním úkolem této bakalářské práce je prozkoumání technologie chemické části koksovny, provozované společností ArcelorMittal Ostrava a.s., a určení míst teoretických energetických úspor. Práce je rozdělena na dvě části. V první teoretické části se zaměřuji na vysvětlení, postup a zásady provedení pinch analýzy a popis zařízení, které jsou z hlediska analýzy atraktivní, tedy na tepelné výměníky, jejich typy a vhodnou volbu pro danou technologii. Dále pak tato část obsahuje stručný popis koksochemického provozu. Ve druhé, praktické části, se práce zaměřuje na provedení materiálové bilance koksování, a dále na energetickou bilanci benzolky, která je jednou nejdůležitějších částí koksochemického provozu. Následuje provedení modelové pinch analýzy benzolky.

Klíčová slova: pinch analýza, koksovna, tepelný výměník, energie, entalpická bilance, materiálová bilance

ANNOTATION OF BACHELOR'S THESIS

The main mission of this bachelor thesis is exploration technology of chemical part of coking plant, operated by company ArcelorMittal Ostrava s.r.o., and identify the areas of theoretically energy saves. This thesis is divided into two parts. In first theoretically part I explain the procedure and principles of design pinch analysis and description of equipment, which is attractive in terms of pinch analysis, namely heat exchangers, their type and appropriate choice for the technology. In addition, this section includes a brief description of coke oven by product plant. In second practice part thesis focuses on the design material balance of coking and then on energy balance of benzol plant, which is the one of the most important part of coke oven by product plant. Following execution model pinch analysis of benzol plant.

Keyword: pinch analysis, coke plant, heat exchanger, energy, enthalpy balance, material balance

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Teoretická část	2
2.1	Pinch analýza.....	2
2.2	Energetická zařízení uplatňující se v pinch analýze.....	13
2.3	Chemická část koksovny	15
3	Praktická část	22
3.1	Materiálová bilance	22
3.2	Energetická bilance	24
3.3	Sestavení kombinace složených křivek	27
3.4	Sestavení síťového diagramu	28
4	Výsledky a diskuse.....	28
4.1	Návrh řešení úspor energie.....	28
4.2	Výpočet úspory.....	29
5	Závěr	32
6	Použitá literatura	33
7	Seznam použitých značek a symbolů.....	35
8	Seznam obrázků	36
9	Seznam tabulek	36
10	Přílohy	37

1 Úvod

Koksovna je neodmyslitelnou součástí hutního podniku. Při přeměně uhlí na koks se však netvoří pouze tento pevný produkt, využívaný jako redukční činidlo především do vysokých pecí na výrobu surového železa, ale vzniká i produkt plyný, čímž je koksárenský plyn. V tomto plynu jsou vedle velkého množství vodíku, oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého, metanu aj. obsaženy také páry dehtu, benzolu, amoniaku a sulfanu. Tyto látky je nutné z plynu odstraňovat jednak z environmentálních důvodů, jednak proto, že jsou cennými složkami na trhu chemického průmyslu. Proto můžeme na každé koksovně v bezprostřední blízkosti koksárenských baterií nalézt chemickou část zpracovávající právě tento vedlejší produkt.

Provoz koksochemie je tvořen navzájem propojenými aparáty, ve kterých dochází především ke chlazení plynu, při které dochází ke kondenzaci řady látek. Ostatní látky lze z plynu odstranit vypíráním médii různého složení, popřípadě vodou. Na celém procesu se proto podílí mnoho proudů, a to buď teplých či studených, které je potřeba chladit popřípadě ohřívat. Všechny tyto operace vyžadují velké množství energie. Pokud se podaří dostatečné rekuperace, dá se energie značně ušetřit. Náklady na energie tvoří podstatnou část ceny produktů, často je tímto ovlivněna i konkurenceschopnost podniků. Proto se každý výrobce snaží náklady minimalizovat, v oblasti energetiky například použitím tepelných výměníků na vhodných místech. K identifikaci možných energetických úspor existuje řada postupů, dnes velmi oblíbenou a používanou je metoda Pinch analýzy.

2 Teoretická část

2.1 Pinch analýza

Pinch analýza poskytuje systematickou metodologii pro identifikaci tepelných potenciálů v procesu a jejich možné využití pro energetické úspory. Metoda je použitelná jak ve stávajícím provozu, tak při jeho projektování. Umožňuje minimalizovat spotřebu energie v procesech, a to prostřednictvím optimalizace systémů rekuperace tepla, způsobu zásobování energií a provozních podmínkách procesů.

Primárním cílem pinch analýzy je poskytnout tepelnou a ekonomickou optimalizaci procesu. [1]

Pinch analýza zkoumá chemický proces a okolní technologie s použitím prvního a druhého termodynamického zákona. První termodynamický zákon poskytuje rovnici pro výpočet změny entalpie proudu průchodem přes tepelný výměník. Druhý termodynamický zákon určuje směr tepelného toku. Prakticky to znamená, že tepelná energie může proudit pouze ve směru od teplejšího média ke chladnějšímu. Tímto pravidlem se řídí předávání tepla v tepelných výměnících. Ve výměnících tepla nemůže být teplý proud ochlazen pod vstupní teplotu studeného proudu a naopak studený proud ohřát nad vstupní teplotu teplého proudu. V praxi je možné horký proud ochladit na teplotu definovanou minimálním teplotním rozdílem výměníku. Tento rozdíl je minimální dosažitelný rozdíl teplot (ΔT_{\min}) mezi teplotními profily teplého a studeného proudu podél výměníku. Hodnota teploty, při které je zjištěn minimální teplotní rozdíl mezi proudy je označována jako pinch bod, nebo též pinch podmínka a představuje minimální hnací sílu přenosu tepla ve výměníku. [2,6]

2.1.1 Vývoj pinch technologie a pinch analýzy

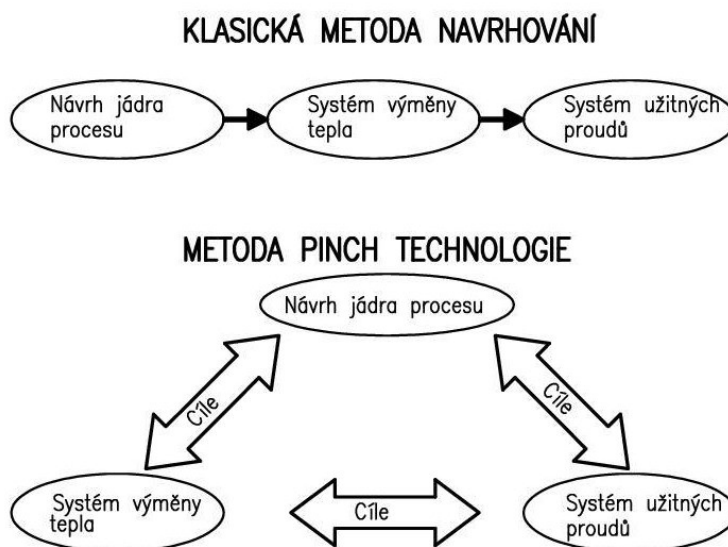
Poprvé se pojem pinch technologie objevil okolo roku 1978 (Bodo Linnhoff, John Flower). [3] V té době sloužil jako nástroj k návrhu sítě výměníků tepla jako odezva na tehdy aktuální energetickou krizi. Metoda byla odlišná než většina dosud používaných počítačových postupů. Inženýři používali jednoduché cíle, které braly v úvahu provozuschopnost, plán výroby, bezpečnost atd. a směřovali návrhy k řešení, které nebyly pouze tepelně efektivní (z hlediska pinch technologie) ale i průmyslově přijatelné (z inženýrského hlediska).

Od té doby se metoda rozšířila do více oblastí. Její princip je stále založen na termodynamických zákonech a její klíčovou strategií je stále upřednostnění dosažení cílů před návrhem zařízení. Nicméně se aplikuje i na ostatní procesy včetně destilace, tepelných

čerpadel, kogeneračních turbín, pecí atd. a na neenergetické oblasti jako jsou kapitálové náklady, provozuschopnost a emise. V praxi se procesní analýze stále více říká pinch analýza než technologie. [3]

2.1.2 Metoda pinch analýzy

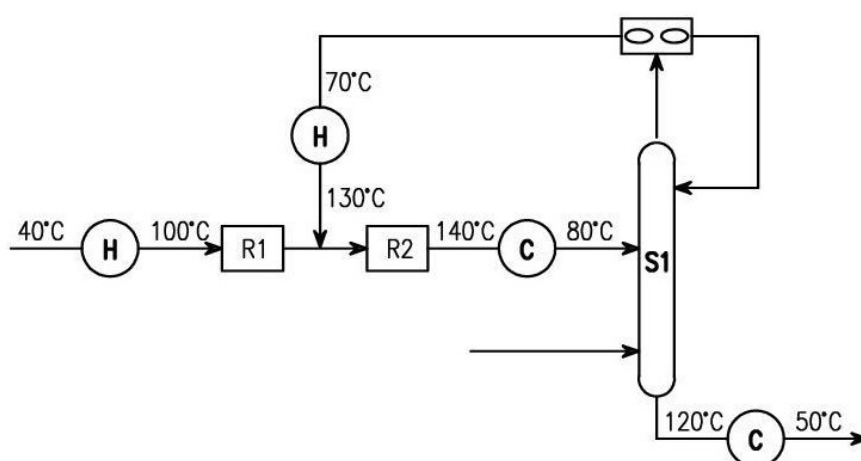
Na obrázku 1 (Obr. 1) je vidět porovnání pinch analýzy s klasickou metodou projektování. V klasické metodě se začíná návrhem jádra procesu s pevně danými průtoky a teplotami, po energetické a materiálové bilanci se provede návrh tepelných výměníků a následně dalších jednotkových operací. Každá oblast se provádí nezávisle na ostatních. Při použití pinch analýzy se opětovné využití tepla a doplňující systémy berou v úvahu již při samotném návrhu jádra procesu. Taktéž se bere v úvahu propojení mezi tepelnými výměníky a ostatními částmi provozu. Pinch analýza odhaluje příležitosti k pozměnění jádra procesu s ohledem na energetické úspory a optimalizuje tepelné procesy mezi jednotlivými zařízeními. Tato metoda je výjimečná v tom, že zachází s celým provozem s mnoha proudy jako s jedním uceleným systémem. [2]



Obr. 1 Srovnání klasické metody návrhu procesu a metody založené na pinch technologii

2.1.3 První kroky pinch analýzy

Na obrázku 2 (Obr. 2) je vidět schéma jednoduchého technologického procesu. Prvním krokem je identifikace horkých a studených proudů. Horkým proudem rozumíme ten proud, který musí být ochlazen, nebo je dostupný až po ochlazení (například produkty). Studeným pak ten, který musí být ohřát, což mohou být například proudy vstupující do reaktoru. [4]



Obr. 2 Schéma jednoduchého technologického procesu

Dalším krokem je získání provozních dat. Jsou to především vstupní (T_s) a výstupní (T_T) teploty a průtoky (\dot{m}). Tato data jsou důležitá zejména pro sestavení materiálové a energetické bilance provozu, což je pro další postupy klíčové.

Z průtoků \dot{m} [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$], které získáme z provozních dat a ze specifické tepelné kapacity cp [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] získané z tabulek, lze vypočítat rychlost změny tepelné kapacity CP [$\text{kW} \cdot \text{K}^{-1}$]:

$$CP = \dot{m} \cdot cp \quad [\text{kW} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1)$$

Z prvního termodynamického zákona získáme rovnici:

$$\Delta H = Q \pm W \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2)$$

Přírůstek entalpie ΔH je tedy roven teple Q , které soustava přijala za konstantního tlaku, pokud se přitom nekonala jiná než objemová práce.

V tepelných výměnících se nekoná mechanická práce $W = 0$, proto tuto rovnici můžeme přepsat na tvar:

$$\Delta H = Q \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (3)$$

Kde Q představuje teplo přijaté nebo odevzdané daným proudem. Rovnici lze tedy upravit:

$$\Delta H = CP \cdot (T_s - T_T) \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (4)$$

Inspiraci v obdobných příkladech lze nalézt také v literatuře [4 a 5]. Získaná a vypočtená data lze zapsat do následující tabulky.

Tabulka 1 Tabulka s daty nezbytnými pro pinch analýzu

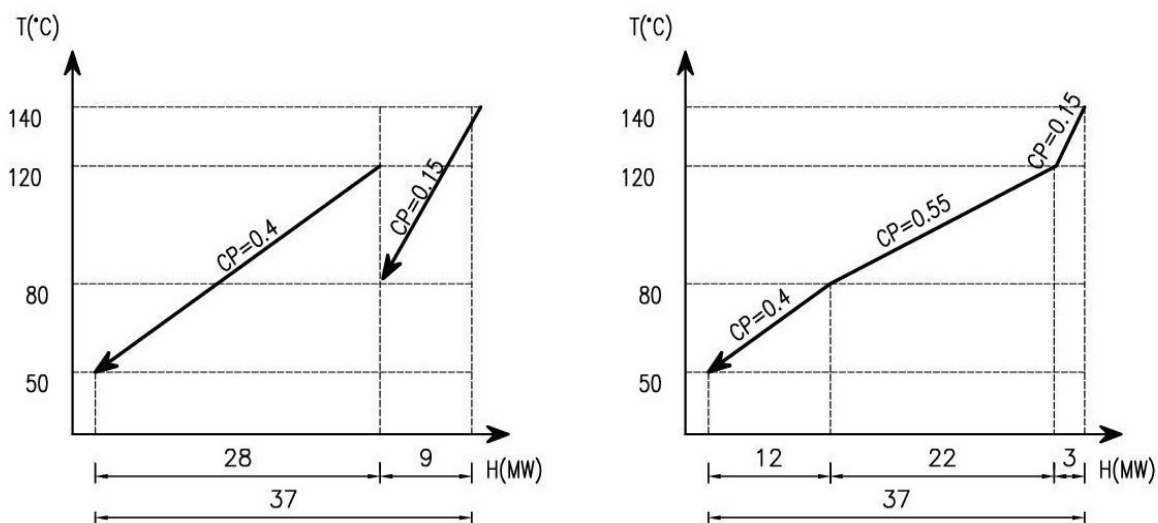
Proud	Typ	Vstupní teplota T_s [°C]	Výstupní teplota T_T [°C]	Změna entalpie ΔH [MW]	Rychlost změny tepelné kapacity CP [MW.K ⁻¹]
1	horký	140	80	-9	0,15
2	horký	120	50	-28	0,4
3	studený	70	130	30	0,5
4	studený	40	100	12	0,2

2.1.4 Sestavení složených křivek

Složená křivka představuje závislost teploty na změně entalpie (T-H diagram) pro jednotlivé typy proudů, tedy horké a studené proudy zvlášť.

Do diagramu se nejprve vynesou závislosti pro dva horké proudy, jak je ukázáno na obrázku 3 (Obr. 3). Rovný průběh naznačuje konstantní specifickou tepelnou kapacitu. Pozice proudu v diagramu teplota-změna entalpie závisí na měřítku entalpie, které je ovlivněno zvolenou referenční hodnotou entalpie vhodnou pro všechny proudy. Poté je změna entalpie všech proudů normalizována stejně.

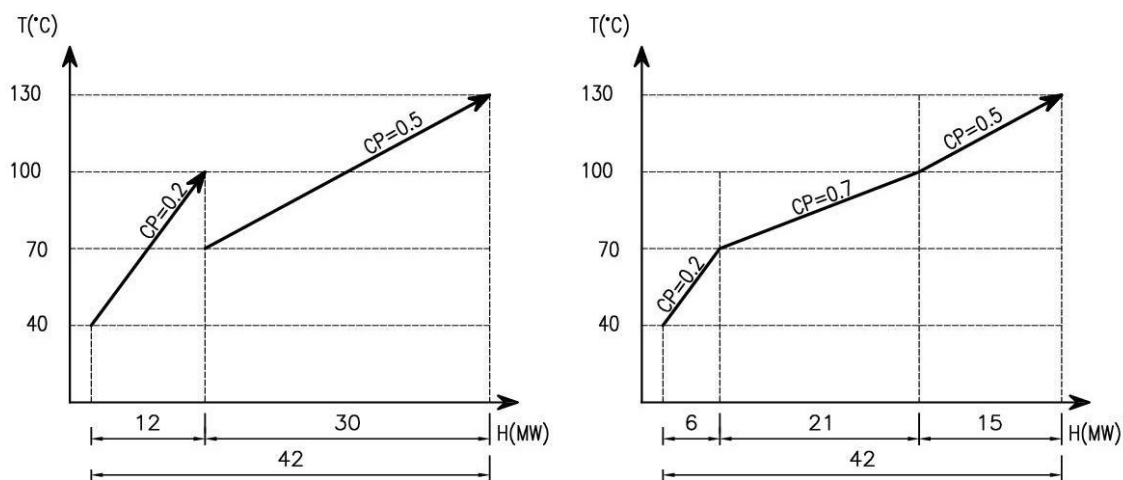
Obr. 3 pak představuje spojení dvou horkých proudů za vzniku tzv. horké složené křivky. V místech, kde proudy mají společný teplotní rozsah, lze změnu entalpie a tepelnou kapacitu průtoku kombinovat. Složená křivka je pak jednoproudý ekvivalent dvou oddělených proudů s ohledem na jejich teplotu a entalpii.



Obr. 3 Sestavení horké složené křivky.

Obdobně lze složenou křivku sestavit i pro studené proudy, jak je vidět na Obr. 4.

[4]



Obr. 4 Sestavení studené složené křivky.

Složené křivky jsou grafickým znázorněním dostupného tepla (horká složená křivka) a požadovaného tepla (studená složená křivka) ve sledovaném procesu.

Pro výměnu tepla mezi teplým a studeným proudem je nezbytné, aby složená křivka horkého proudu ležela nad složenou křivkou studeného proudu. Vzhledem ke tvaru složených křivek, které se k sobě nejvíce přibližují v jednom místě, lze tento definovat jako minimální dovolený teplotní rozdíl, označovaným jako ΔT_{\min} . Hodnotu ΔT_{\min} lze získat

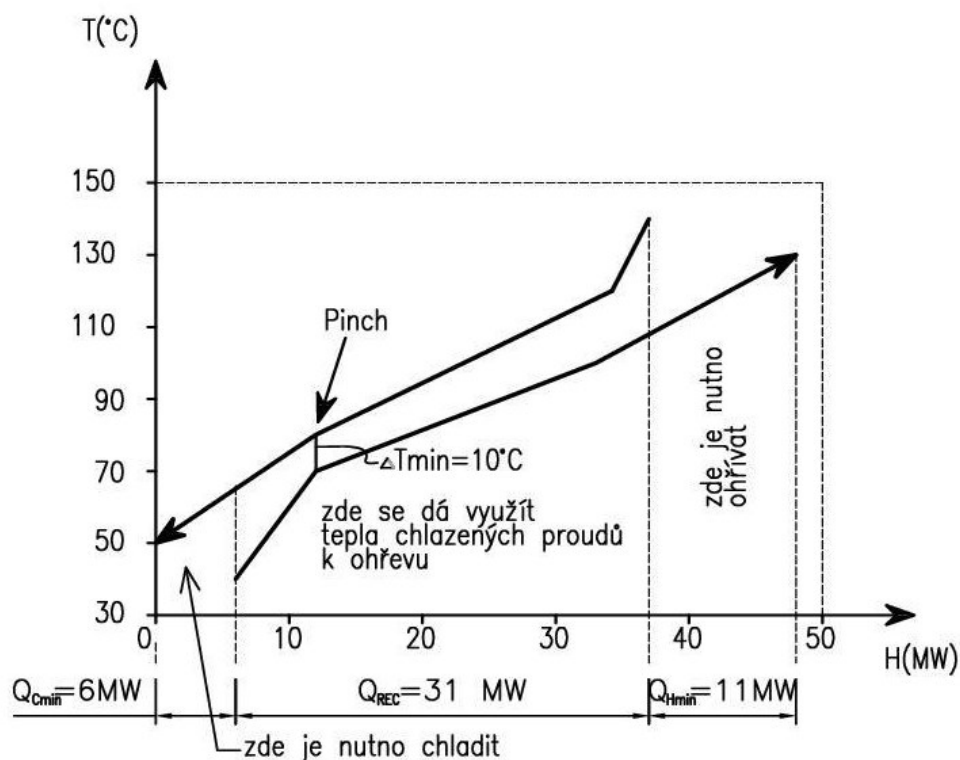
přímo z T-H diagramu, je to minimální vertikální vzdálenost mezi horkou a studenou složenou křivkou, viz Obr. 5. Tento bod představuje nejužší místo při využití odpadního tepla a je běžně označován jako „pinch point“. [2,7]

Překryv mezi složenými křivkami představuje možnou rekuperaci tepla mezi teplým a studeným proudem v procesu. Vždy je výhodné, aby překryv byl co možná největší, pak je maximální potenciál opětovného využití tepla. Pokud je tato podmínka splněna, jsou další požadavky na ohřívání a chlazení minimální. [4,6]

Přesah na horké křivce naznačuje požadavek na chlazení (Q_{Cmin}) a přesah na studené křivce pak představuje nutnost ohřevu (Q_{Hmin}).

Výše uvedené lze tedy shrnout následovně: jednotlivé energetické požadavky jsou dodávány výměnou tepla mezi jednotlivými procesy, případně několika dalšími spotřebními proudy, kterými mohou být například pára, reflux horkého oleje, pecní spaliny apod.

Složené křivky poskytují celkové možné energetické úspory, ale ne moc přesně definují, kolik energie se musí dodat ostatními spotřebními proudy. Pro tyto účely slouží hlavní složená křivka. [2]



Obr. 5 Graf kombinace horké a studené křivky.

2.1.5 Teplotní intervaly pro energetickou bilanci

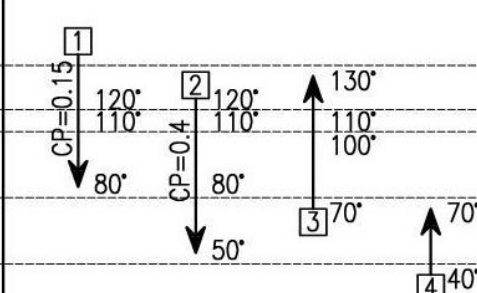
Složené křivky představují mocný nástroj jednak pro stanovení energetického cíle, a také umožňují získat vzhled do návrhu teplosměnných zařízení. Složené křivky jsou založeny na grafické konstrukci, nicméně, alternativní přístup k řešené problematice nabízí tabulka teplotních intervalů. Zde jsou shrnuty informace o teplotách proudů, toku tepelné kapacity, entalpie a je zde také uvedeno, zda má proud entalpie přebytek nebo deficit. Typická tabulka teplotních intervalů pro jednoduchý proces je uvedena v Tabulka 2. Tabulka teplotních intervalů vychází z dat uvedených v Tabulka 1 a aplikací několika následujících kroků.

Krok 1. Prvním krokem je upravení vstupních a výstupních teplot procesu. U horkých proudů se teploty redukuje o polovinu hodnoty ΔT_{\min} . U studených proudů pak o tu samou hodnotu zvyšují. Tyto upravené hodnoty nejsou skutečnými teplotami, složí pouze v zájmu algoritmu jako teplotní interval.

Krok 2. Druhým krokem je vytvoření intervalu pro tepelnou bilanci. Horké a studené proudy se překrývají v příslušných teplotních intervalech, zároveň jsou od sebe v teplotním horizontu odděleny o hodnotu ΔT_{\min} . Toto zajišťuje termodynamický možný tepelný přenos mezi každým teplotním intervalem.

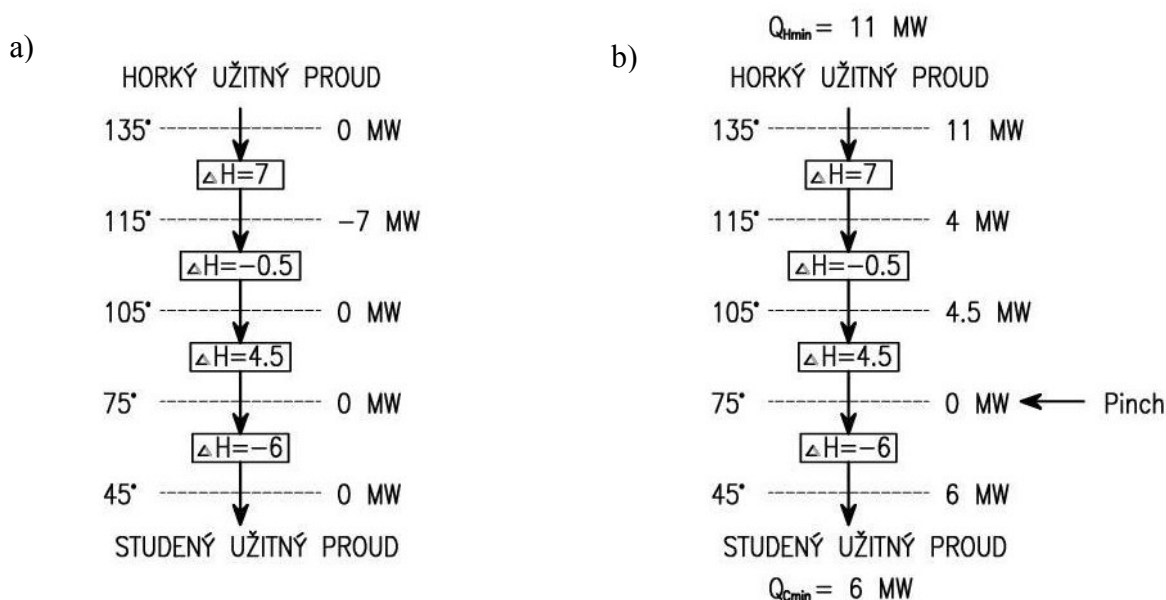
Krok 3. Nyní je nutné v jednotlivých teplotních intervalech provést tepelnou bilanci s použitím vzorce $\Delta H_{\text{interval}} = \Delta T_{\text{interval}} [\sum CP_C - \sum CP_H]$. Výsledek může být buď kladný, což naznačuje tepelný nedostatek neboli deficit, nebo záporný, který představuje přebytek tepla v daných teplotních rozmezích. Shrnutí ukazuje následující Tabulka 2 Teplotní intervaly energetické bilance

Tabulka 2 Teplotní intervaly energetické bilance

teplotní interval	proudy	$\Delta T_{\text{INTERVAL}}$ (°C)	$\frac{\sum CP_C}{\sum CP_H}$ (MW/°C)	$\Delta H_{\text{INTERVAL}}$ (MW)	přebytek / deficit
135°					
115°		20	0.35	7	Deficit
105°		10	-0.05	-0.5	Přebytek
75°		30	0.15	4.5	Deficit
45°		30	-0.2	-6	Přebytek

Ty intervaly, které mají přebytek tepla, by měly dodat alespoň část schodku pro ta rozmezí, které mají tepla nedostatek.

Druhá věta termodynamická říká, že tepelná energie může proudit přes teplotní gradient, pokud se v systému koná práce (např. tepelná pumpa). Pokud však všechen tepelný přenos probíhá v tepelných výměnících, kde se práce nekoná, je možný pouze ve směru dolů po teplotním intervalu. Obr. 6a) představuje seřazené hodnoty změny entalpie podle klesající teploty, kde do intervalu s nejvyšší teplotou není dodáváno žádné teplo z okolních systémů. Záporná hodnota změny entalpie tepelného průtoku naznačuje, že by teplo mělo proudit směrem nahoru, což není možné. Je proto nutné udělat opatření, aby nedocházelo k výskytu těchto záporných hodnot. Nejjednodušší cestou je použití okolních systémů k dodání vstupního tepla do prvního intervalu.



Obr. 6 Kaskáda teplotních a tepelných intervalů. a) Kaskáda bez tepelného vstupu. b) Kaskáda s přidáním tepla z okolních užitečných systémů.

Krok 4. Z Obr. 6a) je vidět, že největší záporný tepelný tok má hodnotu -11 MW. Toto množství tedy musí být dodáno z horkých okolních proudů do prvního teplotního intervalu. Obr. 6b) je obdobně sestaven jako Obr. 6a), avšak již s přidáním tepla. Množství tepla opouštějící poslední teplotní interval je zpracováváno v okolních chladicích jednotkách.

Je možné vidět, že hodnoty množství tepla vstupujícího a vystupujícího z kaskády teplotních a tepelných intervalů korespondují s hodnotami získaných ze složených křivek.

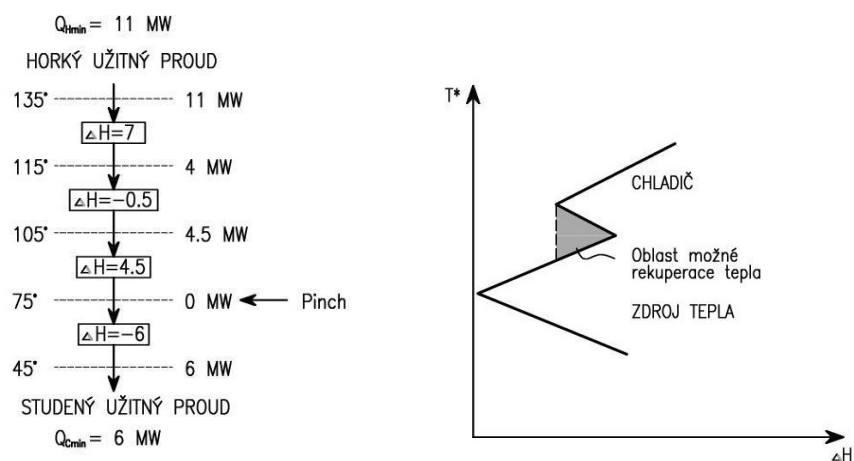
Důležitým místem v kaskádě je bod, ve kterém je nulový tepelný tok. Zde je teplotní interval okolo hodnoty 75°C a blíží se umístění bodu pinch. Pro pinch horkého proudu tudíž odpovídá teplota 80°C, pro studený proud pak 70°C. Opět tyto hodnoty korespondují s hodnotami ze složených křivek.

Tato metoda poskytuje přímý algoritmus pro výpočet nutného množství přidaného a odebraného tepla a ukazuje na umístění pinch teploty, což je pro další práci kritické. [4]

2.1.6 Hlavní složená křivka

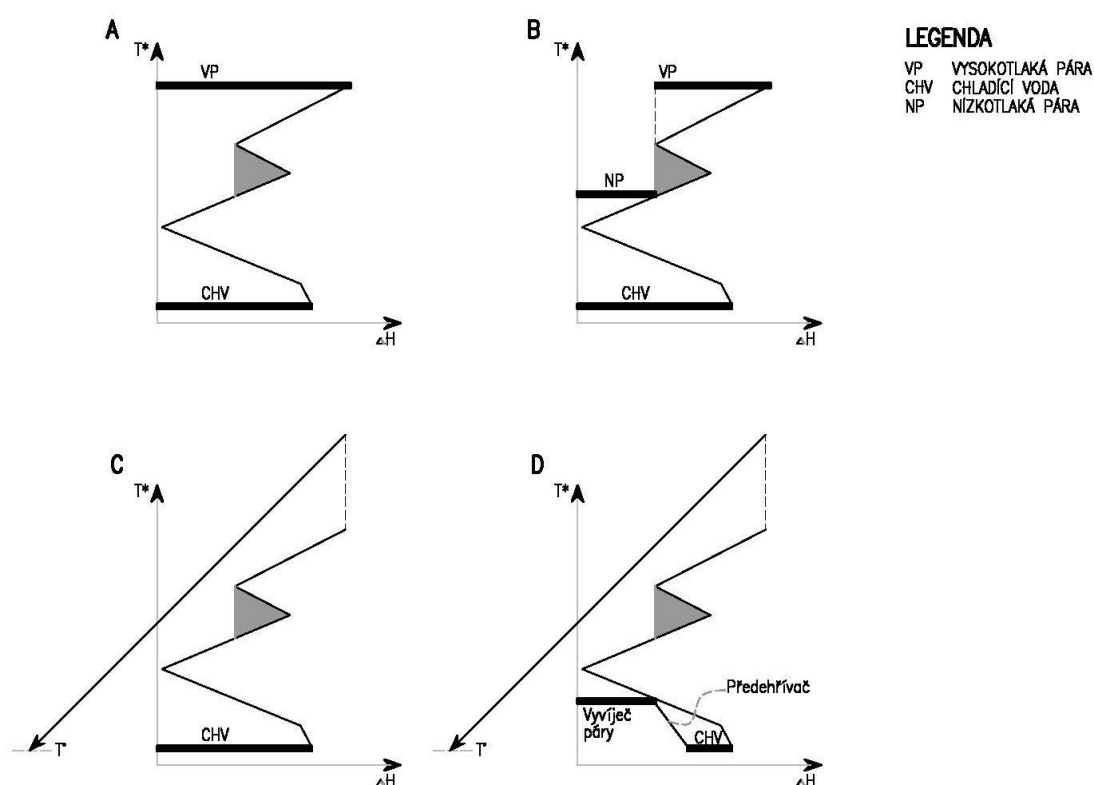
Pro výběr užitných proudů, stanovení jejich teploty a dalších parametrů, nejsou složené křivky ani tabulka teplotních diferencí příliš užitečné. Proto se začal používat nový nástroj, zvaný jako hlavní složená křivka, kterou zavedli v roce 1982 Itoh, Shikoro a Umeda [2]. Tato křivka znázorňuje změnu v příjmech a výdajích tepla v procesu. Při použití tohoto diagramu mohou návrháři najít ten správný užitečný proud, který jim zajistí nejnižší náklady. Nejčastěji používanými médii na chlazení jsou chladicí voda nebo jiné chladicí médium, na ohřev pak nízko či vysokotlaká pára, přičemž chladicí voda a nízkotlaká pára jsou preferovány kvůli nižší ceně za jednotku. [2]

Konstrukce hlavní složené křivky vyžaduje znalost tepelných toků (kaskády teplotních diferencí). Na Obr. 7 můžeme vidět vyznačenou oblast možné rekuperace tepla, tj. místo, kde se zachycuje přebytečné teplo a je dodáváno tam, kde je ho potřeba.



Obr. 7 Hlavní složená křivka.

Na následujícím obrázku Obr. 8 jsou uvedeny ukázky použití jednotlivých užitečných proudů. Pokud se profil užitečného proudu dotýká hlavní složené křivky, neznamená to, že $\Delta T = 0$. Teplotní posun zahrnutý do sestavení tabulky teplotních diferencí znamená, že horký a studený proud jsou posunuty o $\Delta T_{min}/2$. To znamená, že pokud se profil teplosměnné jednotky dotkne hlavní složené křivky je teplotní rozdíl následující $\Delta T = \Delta T_{min}$. [4]



Obr. 8 Příklady použití hlavní složené křivky

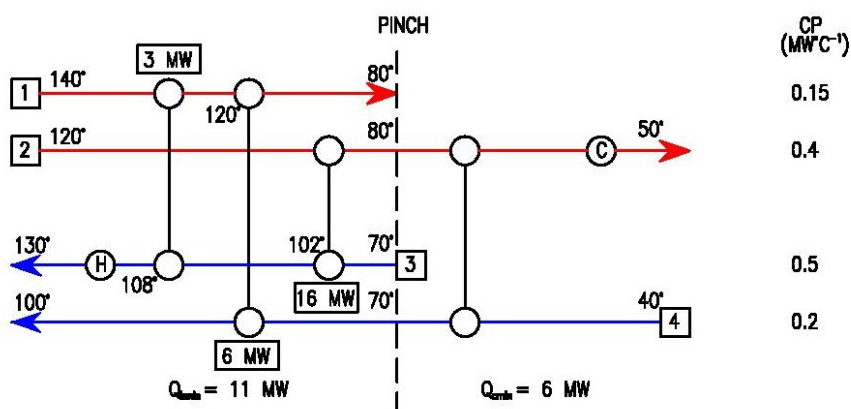
2.1.7 Návrh sítě výměníků tepla

Síť výměníků tepla je navrhována na základě výsledků pinch analýzy a měla by sloužit k uspokojení nově navrhovaných energetických potřeb. Někdy se nazývá Pinch design method. [2] Pinch technologie dodržuje tři základní pravidla pro praktický návrh sítě tepelných výměníků:

- Nepoužívat externí ohřev pod pinch teplotou
- Nepoužívat externí chlazení nad pinch teplotou
- Neprovádět přenos tepla přes pinch teplotu.

Porušením některého z těchto pravidel má za následek nežádoucí zvýšení energetických požadavků. [4]

Tato metoda používá speciální grafické zobrazení nazývané síťový diagram Obr. 9. Horké proudy jsou vyznačeny červeně a jsou umístěny v horní části, studené proudy pak mají modrou barvu a nachází se ve spodní části diagramu. Vertikálně umístěná čára pak představuje bod pinch s odpovídající teplotou pro horké a studené proudy, rozděluje diagram na dvě části. Nalevo je systém pod bodem pinch, napravo pak systém nad tímto bodem. Tepelný výměník v mřížkovém diagramu reprezentuje vertikální čára spojující dva proudy, na každé straně pak ohraničená otevřeným kolečkem. Při návrhu nad bodem pinch je nutné dodržet podmínku, že studený proud musí mít vyšší hodnotu rychlosti změny tepelné kapacity než proud teplý, tedy $CP_s \geq CP_h$. Tím je dodrženo i to, že v T-H diagramu se křivky teplého a studeného proudu okolo hodnoty ΔT_{\min} rozbíhají. Opačná podmínka pak platí při návrhu sítě výměníků na straně levé, tedy pod bodem pinch. Zde je nutné, aby teplé proudy měly hodnotu rychlosti změny tepelné kapacity vyšší než proudy studené, tedy $CP_h \geq CP_s$. [5]



Obr. 9 Síťový diagram.

Další otázkou v návrhu sítě je přesah jednotlivých energetických proudů s ohledem na počet a velikost navrhovaných teplosměnných zařízení. Optimální je stav, kdy přesah proudů je značný, čímž se výrazně snižuje počet nutných výměníků tepla, čímž se redukuje přímé investiční náklady. [4]

2.1.8 Přínos pinch analýzy

Jednou z hlavních výhod pinch analýzy oproti běžným metodám je možnost nastavení energetických a ekonomických cílů pro individuální proces nebo celý výrobní

závod před vlastním návrhem procesu. Umožňuje pozměnit proces tak, aby náklady na energie a tím i na celou výrobu byly co možná nejmenší.

Aplikace pinch analýzy vždy vede k výraznému zlepšení energetické a nákladové efektivnosti pro různá průmyslová zařízení na celém světě. Má úspěšnou aplikaci v mnoha odvětvích průmyslu, od petrochemického, chemického až po potravinářství či výrobu papíru, v kontinuálních i přetržitých provozech. Prakticky při každém projektování nové výrobní technologie, hraje tato analýza velmi důležitou roli. [2]

2.2 Energetická zařízení uplatňující se v pinch analýze

2.2.1 Tepelné výměníky

Zařízení, ve kterém dochází k výměně tepla mezi médii o různé teplotě přes pevnou stěnu, se nazývá tepelný výměník. Důmyslným propojením celé technologie do sítě výměníků tepla je možné ušetřit velké náklady na ohřev a chlazení, které jsou často klíčové pro konkurenceschopnost produktu.

Jako teplonosné médium se pro ohřev do 100°C používá teplá voda, pro ohřev na vyšší teploty pak méně těkavé látky, jako jsou oleje či parafíny. Ohřívání na vyšší teploty je také možné provést vodní párou, kdy tlak dosahuje až 1,8 MPa. Beztlaká vodní pára, též nazývaná brýdová, má teplotu pouze 100°C, při jakékoliv tepelné ztrátě začne hned kondenzovat, proto se nehodí na dopravu delším potrubím.

Pro chlazení je nejtýpější voda, pro teploty mírně pod nulou pak roztok soli, tzv. solanka. Chladicí voda pro průmysl se nejčastěji bere z nádrží či vodotečí, obvykle se upravuje pouze filtrací. Velké podniky pak musejí mít svůj vlastní okruh chladicí vody, která se ochlazuje odpařováním do vzduchu v chladících věžích. V letních měsících chladicí vodu někdy nelze ochladit na teplotu pod 30°C, proto je nutné použít zvláštní technologie, jako je například stojní chlazení. [9]

2.2.2 Typy tepelných výměníků

2.2.2.1 Dělení podle způsobu předání tepla mezi médii

Podle tohoto kritéria se výměníky dělí na rekuperační, regenerační a směšovací. U rekuperačních se k přenosu tepla využívá pevná teplosměnná plocha oddělující média. Tento typ je používán nejčastěji. U regeneračních výměníků je teplosměnná plocha střídavě ohřívána teplejší látkou a následně ochlazena látkou studenější. Tento typ se využívá zejména v procesech, kdy nevádí, že dojde ke smísení jednotlivých médií. Jedná

se o výměníky vzduch-vzduch, nebo vzduch-spaliny. Posledním typem jsou směšovací výměníky, kde se média dostávají do bezprostředního kontaktu. [10]

2.2.2.2 Dělení podle typu konstrukce

U rekuperačních výměníků se může konstrukce lišit. Tento typ lze dále dělit na výměníky trubkové, trubičkové, deskové a šroubovicové. Regenerační výměníky pak rozdělujeme na reverzní regenerační výměníky, používané zejména u koksárenských pecí, a na rotační výměníky. Poslední typ výměníků, směšovací, má ve většině případů pouze jedno konstrukční řešení, a to tlakovou nádobu, v níž proudí chlazené médium, do níž je vstřikováváno chladicí médium. [10]

2.2.3 Volba tepelného výměníku

Hlavním kritériem pro volbu správného regeneračního výměníku je fakt, že se snažíme přenést co nejvíce tepla za jednotku času.

Výhodné je tedy mít co možná největší součinitel prostupu tepla. Jelikož obvykle nelze ovlivnit vlastnosti chlazené či ohřívané látky, musíme se zaměřit na konstrukční materiál výměníku. Nejvhodnější je ten, který má nejvyšší vodivost, avšak musíme brát zřetel na možnou korozi či znečištění úsadami, což má opačný efekt. Dalším možným způsobem zvýšení koeficientu přestupu tepla je náhrada volné konvekce za nucenou, dále pak zvýšení rychlosti proudění, vytvoření turbulence.

Dalším benefitem účinného výměníku je co největší teplosměnná plocha. Pokud se u trubkových výměníků zvětšuje průměr trubek, zhoršuje se tím koeficient prostupu tepla. Pokud se naopak trubky prodlužují, zvětšuje se tím tlaková ztráta. Jako ideální se pak jeví možnost zvolit větší svazek užších trubek. U deskových výměníků, které se skládají z řady desek, v nichž střídavě proudí média, se pro zvětšení teplosměnné plochy přidávají další řady desek. Tento typ výměníků se s oblibou používá tam, kde se pracuje za normálního tlaku a kde je potřeba výměník rozebrat a vyčistit. [9]

2.2.4 Souproudý a protiproudý výměník

U výměníků, zejména trubkových, je možné vést média ve stejném směru, pak ho označujeme jako souproudý, nebo ve směru opačném, pak se jedná o protiproudý výměník. U souproudého výměníku se teploty médií na výstupu výrazně přibližují, pokud by byl výměník dokonalý, došlo by k jejich vyrovnání. V protiproudém výměníku je v celém rozsahu mezi proudy poměrně malý teplotní spád, zato výstupní teplota chladnějšího proudu může být větší než výstupní teplota teplejšího proudu. [9]

2.3 Chemická část koksovny

Výroba chemických produktů koksování spočívá v zachycení a oddělení jednotlivých cenných látek, obsažených v těkavých karbonizačních produktech. Základními chemickými produkty koksování jsou dehet, benzol, naftalen, amoniak a koksárenský plyn. Výroba chemických produktů koksování je stejně důležitá jako vlastní výroba koksu, neboť se jí plně využívá uhelná surovina. [11]

2.3.1 Tvorba těkavých produktů koksování

Těkavé látky vznikají při koksování jako výsledek složitých dějů při vysokých teplotách, které za nepřístupu vzduchu způsobují rozklad uhlí. Látek, které přitom vznikají, je velké množství a jsou nejrůznějšího charakteru.

Rozklad uhlí začíná při teplotách okolo 300°C. V rozmezí teplot 500 až 600°C se jako prvotní produkty karbonizace tvoří nízkoteplotní dehet a plyn. Tyto produkty se však rozkládají dříve, než opustí koksovací komoru, stykem s horkým koksem, se stěnami komory a při průchodu sběrným prostorem. Přitom vznikají nové látky odlišného charakteru.

Při vyšších teplotách se rychle zmenšuje množství dehtu, ale velmi vzrůstá vývoj plynu, jelikož vzniká více vodíku. Těkavé karbonizační produkty obsahují velké množství vodních par, hlavně z vlhkosti uhlí. Část páry se také tvoří z vodíkatých a kyslíkatých sloučenin obsažených v uhlí při jeho karbonizaci (pyrogenetická voda).

Při teplotách nad 850 °C se podporuje rozklad dehtu, benzolu a toluenu, a zároveň se tvoří méně vítané nebo i nežádoucí sloučeniny (naftalen, antracen, grafit). Při nízkých teplotách, pod 700°C, vzniká mnoho nežádoucích fenolů a nenasycených uhlovodíků. Proto se při koksování snažíme dodržet teplotu sběrného prostoru na 750 až 800°C.

Množství a složení těkavých produktů se mění během doby koksování. Na začátku koksování je velký vývoj plynu, který obsahuje hodně vody a uhlovodíků (dehet, benzol, metan). Ke konci koksování ustává tvorba těchto látek, vyvíjí se méně plynu, který obsahuje převážně vodík. [11]

2.3.2 Technologický postup zpracování surového koksárenského plynu

Surový koksárenský plyn odchází z koksárenských komor s teplotou asi 600°C. Obsahuje vlastní plynné složky (H_2 , CH_4 , C_nH_m , CO , CO_2 , N_2 a O_2), dále dehtové páry, páry benzenu a jeho homologů, nečistoty (NH_3 , H_2S , sirné sloučeniny) a velké množství vodní páry. [12]

2.3.2.1 Chlazení surového plynu v předloze

V předloze se horký karbonizační plyn chladí přímou sprchou fenolčpavkové vody, při čemž z něho kondenzuje asi polovina dehtových par. Přestože se fenolčpavková voda nastříkovaná do stoupaček a předlohy odpaří asi jen z 2-3%, přesto se podílí na chladicím účinku předlohy 70%. Zbylých 30% chlazení se provádí jednak na úkor ohřátí fenolčpavkové vody, jednak na úkor sálání do okolí, a to přibližně stejným podílem.

V předloze kondenzují pouze dehtové páry, nikoli však vodní páry z plynu, naopak vypařováním fenolčpavkové vody se obsah vodních par v plynu zvětšuje asi na dvojnásobek.

Plyn odcházející z předlohy, který je teplý 80 až 100°C, obsahuje hmotnostně 1,5 až 2krát více vodních par, než je hmotnost suchého koksárenského plynu za normálních podmínek. Proto je nutno plyn především chladit. Při ochlazení dojde ke kondenzaci značné části vodní páry a téměř všeho zbylého dehtu, čímž se výrazně zmenší objem odsávaného plynu. To je důležité pro odsávání a stlačování plynu v odsávačích.

Určité ochlazení plynu nastává také v sacím potrubí mezi předlohou a chladiči tím, že povrch potrubí, kterým proudí teplý plyn, není izolován od okolního ovzduší. Sací potrubí tedy působí jako vzdušný chladič. Protože se i v potrubí plyn částečně ochladí, kondenzuje v něm část dehtu a vodní páry. Z těchto důvodů se sací potrubí staví zásadně šikmé s možností odstraňování usazenin přiváděným dehtem. [12,13]

2.3.2.2 Chlazení surového plynu v primárních chladičích

Do chladičů přichází plyn s teplotou 80-85°C a prakticky nasycený vodní parou. Úkolem chladičů je ochladit plyn na teplotu 25-35°C.

Při nižších teplotách (v zimě) je větší možnost usazování naftalenu v potrubí nebo chladiči, a hrozí nebezpečí jejich ucpání. Chladí-li se nedostatečně (v létě), odnáší plyn mnoho dehtu, naftalenu a vody za primární chladič dále do technologie, čímž se ztěžuje provoz odsávače a je rovněž nebezpečí usazování naftalenu v chladnějším potrubí.

Ochlazený plyn obsahuje ještě 2-4 g dehtu na m³ v podobě mlhy a 25-45 g/m³ vodní páry. Při kondenzaci se rozpouští v dehtu většina přítomného naftalenu a malé množství benzenových uhlovodíků. V kondenzující vodě se rozpouští čpavek a jiné látky (H₂S, CO₂, fenoly, pyridinové zásady atd.), čímž je dáno složení vznikající fenolčpavkové vody.

Chlazení může být buď přímé (u nás se nepoužívá) nebo nepřímé, vždy však protiproudé. Při přímém chlazení plynu se do chladiče opatřeného náplní nebo přepážkami nastříkuje chladná čpavková voda (25-30°C) a spodem odtéká přes dělicí nádržku s teplotou 75°C. V dělicí nádrži se oddělí dehet od vody – dehet odtéká do zásobníku dehtu a čpavková voda se čerpá zpět na chladiče. Primární chladiče nepřímé jsou velké železné skříně, které mají uvnitř větší počet trubek. Trubkami proudí voda, prostorem mezi trubkami proudí plyn.

Výkon chladičů závisí přímo na velikosti chladicí plochy, tj. na ploše povrchu všech chladicích trubek. Čím je více tenčích trubek v chladiči, tím je větší chladicí plocha; protože trubkami malých průměrů proudí rychleji voda i plyn, zvyšuje se součinitel výměny tepla a tím i výkon chladiče. Usazeniny z plynu na vnějším povrchu trubek (dehet, naftalen) i z vody uvnitř trubek (rez, bahno) snižují značně hodnotu součinitele prostupu tepla a tím snižují výkon chladiče. [11,12,13]

2.3.2.3 Odlučování dehtové mlhy z plynu

Ochlazením koksárenského plynu v předloze a primárních chladičích se sráží dehet jako kapky různé velikosti. Větší kapky klesají vlastní tíhou dolů a oddělují se tak z plynu. Naproti tomu nepatrné kapičky, jejichž průměr je pod 0,3 μm , tvoří v plynu mlhu, která je volně unášena proudem plynu.

Tu lze odstranit:

- nárazovými odlučovači,
- odstředivou silou,
- elektrostaticky.

Principem nárazových odlučovačů je rozdělení plynu s mlhou na malé praménky, které narážejí na pevné plochy. Při tom částice mlhy, mnohem větší hmotnosti než molekuly plynu, setrvačností přímočarého pohybu narazí na pevnou plochu a ulpí na ni. Molekuly plynu o menší hmotnosti než mlha se překážce vyhnou.

Elektrostatické odlučovače jsou založeny na principu, že v elektrickém poli, vytvořeném mezi dvěma elektrodami, jsou souhlasně nabitě částice odpuzovány a nesouhlasně nabitě přitahovány každou elektrodou.

Elektrofiltr je soustava svislých trubek délky 3-4 m a o průměru 200 mm. Středem každé trubky prochází drát. Do systému se zavádí stejnosměrný elektrický proud o vysokém napětí. Na drát, jenž tvoří tzv. jiskřící elektrodu, se připojuje záporný pól, na

trubku, tvořící srážecí elektrodu kladný. Kapičky dehtu i tuhé látky obsažené v plynu dostanou v elektrickém poli záporný náboj, pohybují se ke srážecí elektrodě, stékají po ní dolů a kapou do odlučovacího prostoru.

Elektrofiltry se někdy staví až za turbodmychadla, na výtlačnou stranu. [11,12,13]

2.3.2.4 Odsávání a doprava plynu – turbodmychadla

Koksárenský plyn musí na cestě z pecí až na místo spotřeby překonávat mnoho odporů. Může to být odpor potrubí, šoupátek a kolen, regulační klapky, primárních chladičů, elektrofiltrů, benzolových praček a tlak plynojemu. Takovýto tlak není možné vytvořit v koksárenských komorách, musí být tedy vytvořen uměle pomocí turbodmychadel. Ty se umisťují co nejbližší ke koksárenským pecím, avšak vždy až za primární chladiče kvůli kondenzaci dehtu. Určitá množství dehtu však v odsávacích stejně kondenzuje, je proto nutné dehet z každého stupně odpouštět.

Principem dmychadel je změna rychlosti plynu dosažené odstředivou silou na tlak. Odstředivá síla se získává rychlým otáčením lopatkového kola uvnitř pláště, obvykle se jich řadí několik za sebou.

Pohon turbodmychadel je buď elektrický, nebo pomocí parní turbíny. Pohon se volí podle aktuálního ekonomického hlediska podniku, či podle potřeby regulace, přičemž pára může snížit výkon odsávače až na 60% maximálního výkonu. [12,13]

2.3.2.5 Koncové chlazení

Koksárenský plyn opouštějící turbodmychadlo či elektrostatický odlučovač, pokud je zařazen, má teplotu 50 až 70°C a pro další technologický postup je jej nutno ochladit na teplotu okolo 25°C. Jelikož toto chlazení bývá při zpracování karbonizačního plynu poslední, nazývá se koncové chlazení.

Koncové chladiče jsou vysoké válcové věže, vrchní část je vlastní chlazení. Používá se zásadně přímé chlazení, kdy z teplého plynu kondenzuje část vodních par, větší podíl ještě přítomného naftalenu a vypírá se i řada jiných látek. Před ochlazením chladicí vody je proto nutné vodu zbavit především naftalenu, což se děje ve spodní části koncového chladiče. Zde se naftalen vypírá také přímým způsobem, a to teplým dehtem. Vyčištěná voda se pak vede na chladicí věže. Koncové chladiče se díky množství naftalenu mohou touto látkou zanášet a proto je nutné je pravidelně propařovat. [11,12,13]

2.3.2.6 Odsíření

V sledované technologii se pod pojmem odsíření rozumí systém jedné sirovodíkové a dvou čpavkových praček.

Z koncového chladiče putuje karbonizační plyn, ochlazený na teplotu okolo 25°C, do sirovodíkové pračky, kde se vypíracím médiem, tvořeným vodou z první amoniakové pračky, odstraní největší podíl sirovodíku. Částečně odsířený plyn pak proudí do první amoniakové pračky, kde je protiproudně vypírán ochlazenou oddehtovanou fenolčpavkovou vodou a vypírací vodou, přiváděnou z druhé amoniakové pračky. V pračce pokračuje odstraňování sirovodíku a čpavku. V druhé amoniakové pračce, kam plyn následně pokračuje, se odstraní většina amoniaku absorpcí a plyn se tak dočistí na požadovaný obsah amoniaku. Zde se jako vypírací médium používá odehnaná amoniaková voda. Ve spodní části této pračky se plyn čistí zředěným roztokem hydroxidu sodného, odstraní se tak zbytky sirovodíku a dalších kyselých složek. [14]

2.3.2.7 Benzolová pračka

Benzol je směs uhlovodíků aromatického charakteru, která je tvořena hlavně benzenem a jeho nejbližšími jednojadernými homology, zejména toluenem a xylenem (proto se benzolová pračka též někdy označuje jako BTX pračka).

Benzol je v koksárenském plynu obsažen v podobě par a je získáván fyzikálním způsobem, tedy vypíráním (absorpcí) pracím olejem.

Benzolové pračky jsou vysoké válcové věže. Plyn vstupuje do pračky, kde se setká s téměř nenasyceným olejem stékajícím po výplni. Tento postup probíhá vícekrát za sebou, obvykle se staví dvě až tři jednoduché pračky za sebou. Jelikož plyn s sebou unáší určité množství pracího oleje, na konci tohoto procesu prochází přes odlučovač kapek.

Takto vyčištěný plyn se vede do plynojemu a používá se jako technický čistý plyn k průmyslovým účelům. [11,12,13]

2.3.3 Doplnující technologie

2.3.3.1 Zpracování surového dehtu

Při chlazení surového plynu v jednotlivých částech provozu kondenzují tekuté podíly, kterým se obecně říká kondenzát. Kondenzát se surového plynu se skládá ze dvou odlišných kapalin, které se spolu nemísí a mají rozdílnou hustotu, a to z čpavkové vody a

dehtu. Oběh kondenzátu je v jednotlivých koksovnách dosti odlišný, avšak jeden způsob je typický.

Kondenzát z předlohy se vede do splachovací nádrže (též v praxi nazývané koráb), kde se oddělí kaly z dehtu a fenolčpavková voda, která se čerpá zpět do předlohy ke chlazení surového karbonizačního plynu. Zbytek ze splachovací nádrže se vede do Stillovy dělicí nádrže, kde spodem odtéká dehet k odvodnění, vrchem pak čpavková voda vedená k odfenolování. Kondenzát z ostatních částí provozu (sací potrubí, primární chladiče, odsávače, elektrofiltry) se vede do sběrné nádoby kondenzátu, odtud se část vede na splachování předlohy a sacího potrubí, přebytek se vede do dělicí nádrže.

Získaný dehet se následně zpracovává destilací, získá se tak několik frakcí, které tvoří buď přímo výrobky, nebo se dále čistí a dělí na další prodejné produkty. Toto zpracování však již obvykle neprobíhá v rámci koksovny. [12,13]

2.3.3.2 Destilace benzolu (benzolka)

Benzol se z nasyceného vypíracího oleje získává destilací, a to s vodní parou.

Olej se vede přes předeřhřivače a následné výměníky do trubkové pece, kde se dále ohřívá na teplotu okolo 175°. Takto teplý olej vstupuje do odháněcí kolony, stéká po patrech, proti němu postupuje přehřátá pára. Páry z kolony se chladí, oddělí se zkondenzovaná voda od meziprojektu. Na vrch kolony se čerpá jako reflux část získaného meziprojektu. Odpařený olej se vede před několik tepelných výměníků a chladičů zpět k vypírání benzolu. Ochlazený a oddělený meziprojekt se přes předeřhřivač čerpá do trubkové pece, kde se ohřívá na teplotu asi 220°C a putuje do rektifikační kolony. Přivádí se zde malý přívod přímé páry, na hlavu kolony se jako reflux čerpá surový benzol. Odcházející páry se ochladí a ve dvoudílném chladiči, spojeném s odlučovačem vody se oddělí surový benzol od vody.

Benzolka je část technologie, která obsahuje velké množství tepelných výměníků, je proto z hlediska pinch analýzy místo teoretických energetických úspor. [12,13]

2.3.3.3 Regenerace vypíracích roztoků z odsíření

Cílem regeneračního zařízení je odstranit z obohacené prací vody amoniak, sirovodík, kyanovodík a oxid uhličitý v podobě brýd a zároveň vyrobit odkyselenou vypírací vodu obohacenou amoniakem pro sirovodíkovou pračku a odehnanou amoniakovou vodu, která se používá k absorpci amoniaku.

Toto zařízení se skládá z odkyselovací kolony, odhaněče volně a pevně vázaného čpavku. Do odkyselovací kolony se přivádí voda obohacená sirovodíkem, kde se za zvýšené teploty odstraní právě sirovodík. Část odkyselené vody se vede zpět do sirovodíkové pračky. V odhaněči volně vázaného čpavku se získává odehnaná voda pro vypírání amoniaku z koksárenského plynu, v odhaněči pevně vázaného čpavku se zpracovává nadbytečná voda, která se následně vede na biologickou čističku odpadních vod. [14]

2.3.3.4 Zpracování amoniaku a sirovodíku

Kyselé brýdy a brýdy z odhaněče volně vázaného amoniaku se vedou do části koksochemie, kde dochází k jejich zpracování. Brýdy se svádějí dohromady a vstupují do tzv. Clausovy pece. Zde dochází ke katalytickému štěpení amoniaku a sirovodíku. Jelikož je v surovém plynu koncentrace sirovodíku podstatně menší než koncentrace amoniaku, musí se ke spalování brýd přidávat i vyčištěný koksárenský plyn. Asi třetina sirovodíku shoří na oxid siřičitý, který reaguje se zbylým sirovodíkem z procesního plynu za vzniku elementární síry. Amoniak je z části spálen na dusík a vodu, zbytek je rozložen na katalytickém loži. Kyanovodík a uhlovodíky podléhají štěpení vodní parou. [15]

3 Praktická část

3.1 Materiálová bilance

3.1.1 Výchozí údaje

Spotřeba uhlí se v každé koksovňě liší díky velikosti koksárenských komor a množství komor, obsazených za jednotlivé dny.

Průměrnou hodnotou je $m_u = 4\,300\,000$ kg mokrého vsázkového uhlí za den.

3.1.1.1 Technická analýza suchého vsázkového uhlí

prchavá hořlavina V^s	popel A^s	vlhkost W^r	síra S^s_c
26,66%	6,65%	8,693%	0,57%

3.1.1.2 Elementární analýza vsázkového uhlí (bezvodné a bezpopelové substance)

uhlík Cb	vodík Hb	kyslík Ob	dusík Nb
88,67%	5,07%	4,80%	1,46%

3.1.1.3 Obsah prchavých látek v suchém koksu

$$V_k^s$$
$$1,0\%$$

3.1.2 Výpočty

3.1.2.1 Váha suchého uhlí v mokré vsázce

$$m_u^s = m_u \cdot \left(1 - \frac{W^r}{100}\right) \quad [kg] \quad (5)$$

3.1.2.2 Váha vody v mokré vsázce

$$W^w = m_u \cdot \frac{W^r}{100} \quad [kg] \quad (6)$$

3.1.2.3 Výtěžek suchého netříděného koksu

$$K^s = \frac{100 - (V^r + W^r)}{100 - V_k^s} \cdot 100 + 1,15 \quad [kg] \quad (7)$$

$$V^r = V^s \frac{100 - W^r}{100} \quad [\%] \quad (8)$$

3.1.2.4 Výtěžek dehtu

$$G_{dh} = [-18,36 + 1,53V^b - 0,026(V^b)^2] \frac{100 - A^r - W^r}{100} \quad [kg] \quad (9)$$

$$A^r = A^s \frac{100 - W^r}{100} \quad [\%] \quad (10)$$

$$V^b = V^s \frac{100}{100 - A^s} \quad [\%] \quad (11)$$

3.1.2.5 Výtěžek benzolu

$$G_{benz} = [-1,61 + 0,144V^b - 0,0016(V^b)^2] \frac{100 - A^r - W^r}{100} \quad [kg] \quad (12)$$

3.1.2.6 Výtěžek amoniaku

$$G_{NH_3} = 0,15 \cdot N^b \cdot \frac{17}{14} \cdot \frac{100 - A^r - W^r}{100} \quad [kg] \quad (13)$$

3.1.2.7 Výtěžek čistého surového plynu

$$G_g = 3 \cdot \sqrt{V^s} \cdot \left[\frac{100 - W^r}{100} \right] \quad [kg] \quad (14)$$

3.1.2.8 Výtěžek síry

$$G_s = \frac{34}{32} \cdot 0,24 \cdot S_w^r \cdot 10 \quad [kg] \quad (15)$$

$$S_w^r = S_c^s \frac{100 - W^r}{100} \quad [\%] \quad (16)$$

3.1.2.9 Množství celkové vlhkosti

$$W_s = W^w + W_{rozkl} \quad [kg] \quad (17)$$

$$W_{rozkl} = 0,55 \cdot \frac{18}{16} \cdot O^r \cdot 10 \quad [kg] \quad (18)$$

$$O^r = O^b \frac{100 - (W^r + A^r + S_w^r)}{100} \quad [\%] \quad (19)$$

3.1.3 Shrnutí materiálové bilance koksování

Tabulka 3 Shrnutí s údaji materiálové bilance koksování [16]

Vstup				Výstup			
	název	množství [kg]	na vlhkou vsázku [%]		název	množství [kg]	na vlhkou vsázku [%]
1.	suché vsázkové uhlí	3 926 201	91,3	1.	koks netříděný	2 958 013	68,79
2.	voda v uhlí	373 799	8,7	2.	dehet	151 360	3,52
				3.	benzol	43 903	1,02
				4.	amoniak	9 747	0,23
				5.	plyn suchý	608 170	14,14
				6.	síra	5 707	0,13
				7.	vlhkost celková	481 987	11,21
					vlhkost uhlí 373 799		
					voda rozkladová 108 188		
				8.	chyba	41 133	0,963
	Celkem	4 300 000	100			4 300 000	100

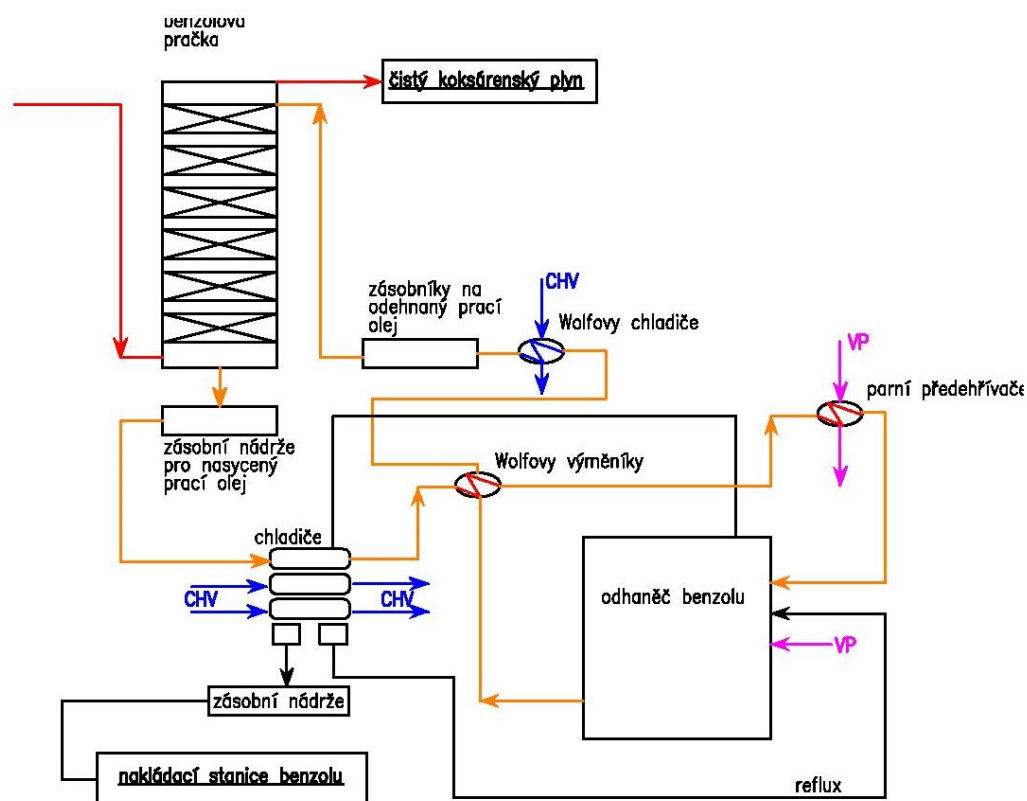
3.2 Energetická bilance

Jelikož je provoz koksochemie složitá technologie, zahrnující velké množství zařízení a operací, budu se dále zajímat pouze o jednu její část, a to benzolku. Způsob výroby surového koksárenského benzolu využívá fyzikální metody, pomocí níž je z koksárenského plynu vypírán benzol pracím olejem, z něhož se zpětně získává benzol jednostupňovou destilací v odhaněči. Současně je možno provádět i regeneraci pracího oleje. Nasycený prací olej, odcházející z benzolové pračky, je přes zásobní nádrž veden do chladičů par, kde je protiprouděně ohříván parami benzolu. Následně vstupuje do Wolfových tepelných výměníků, kde pomocí tepla odehnaného pracího oleje, jdoucího z odhaněče, dochází k dalšímu ohřívání nasyceného oleje. Následné ohřátí na konečnou teplotu okolo 160°C probíhá v parních přehřívacích, kde se přivádí páry o tlaku 1,8 MPa. V odhaněči probíhá destilace vodní parou, hlavou kolony odchází páry vody a

benzolu. Ty se vedou do chladiče par, kde kondenzují, následně se chladí vodou. Kondenzát se oddělí a vyrobený benzol se čerpá do cisteren pro další zpracování. Odehnaný prací olej odcházející ze spodní části odhaněče se pomocí nasyceného oleje ochladí ve Wolfových výměnících. Následně se chladí ve Wolfových chladičích a přes zásobní nádrž vstupuje zpět do benzolové pračky k dalšímu vypírání benzolu z koksárenského plynu. Podrobné schéma benzolky je možné vidět na obrázku Obr.3.1.

Prací olej je směsí vyšších aromatických a heterocyklických sloučenin, získaných jako frakce při destilaci vysokotepelného černouhelného dehtu. Je to tmavohnědá kapalina, hořlavina III. třídy. Prací olej je složen zejména z naftalenu, 2-methylnaftalenu, acetonaftenu a fluorenu.

Vyrobenný benzol je čirá, olejově zbarvená kapalina, skládající se cca ze 75% benzenu, 12% toluenu, 6% xylenu a dalších aromatických uhlovodíků.



Obr. 10 Schéma benzolky

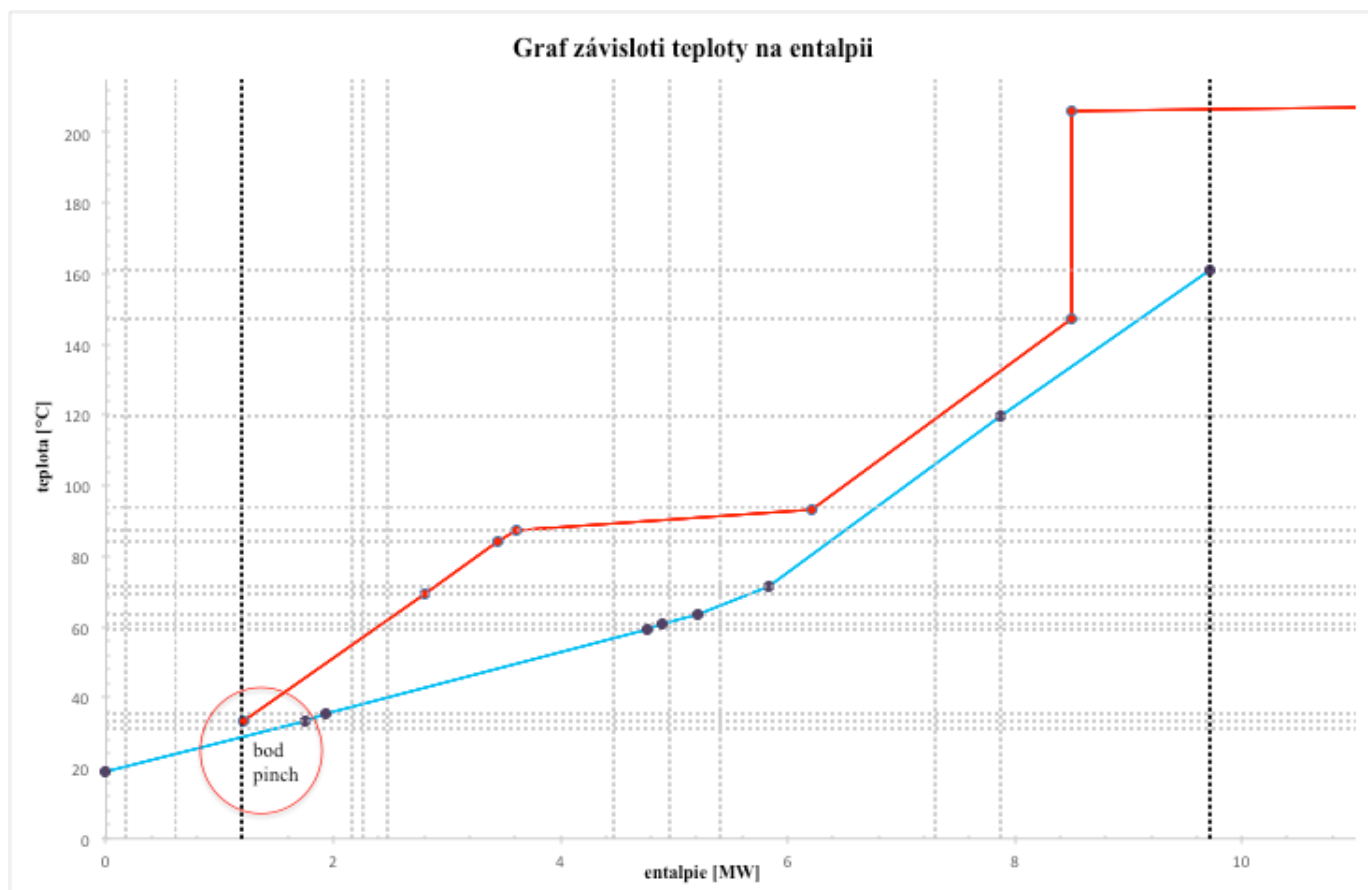
Průtoky, vstupní a výstupní teploty proudů na benzolce byly jednak zjištěny z operačního systému společnosti, jednak z experimentálního měření. Tepelné kapacity a hustoty medií jsou získány z databází fyzikálně chemických dat. Získané a vypočítané hodnoty ukazuje následující Tabulka 4.

Tabulka 4 Tabulka naměřených a vypočtených dat z benzolky

Zařízení	Médium	Typ	Vstupní teplota T_s [°C]	Výstupní teplota T_r [°C]	Změna entalpie ΔH [MW]	Rychlost změny tepelné kapacity CP [MW.K ⁻¹]
chladič par I. válec	NPO	studený	35,4	59,2	0,94	0,039
chladič par II. válec	chladičí voda	studený	18,9	63,3	1,28	0,029
chladič par III. válec	chladičí voda	studený	18,9	33,3	0,42	0,09
Wolfovy tepelné výměníky	NPO	studený	60,7	95,9	2,47	0,042
parní přehříváče	NPO	studený	119,5	160,8	1,85	0,045
Wolfovy chladiče	chladičí voda	studený	18,9	71,2	1,99	0,038
chladič par I. válec	páry vody a benzolu, kondenzát páry	horký	93,3	87,2	1,97	0,323
chladič par II. válec	páry vody a benzolu, kondenzát vody a benzolu	horký	87,2	69,3	2,1	0,117
chladič par III. válec	kondenzát vody a benzolu	horký	69,3	31,2	0,27	0,007
Wolfovy tepelné výměníky	OPO	horký	147	83,9	2,7	0,043
parní přehříváče	pára	horký	207	206	2,58	2,58
Wolfovy chladiče	OPO	horký	71,2	33,3	1,99	0,039

3.3 Sestavení kombinace složených křivek

Na následujícím obrázku Obr. 11 je vidět grafické znázornění vynesení tepelných průtoků do závislosti teploty na entalpii a zvýrazněn bod pinch, představující místo možné rekuperace tepla na benzolce.

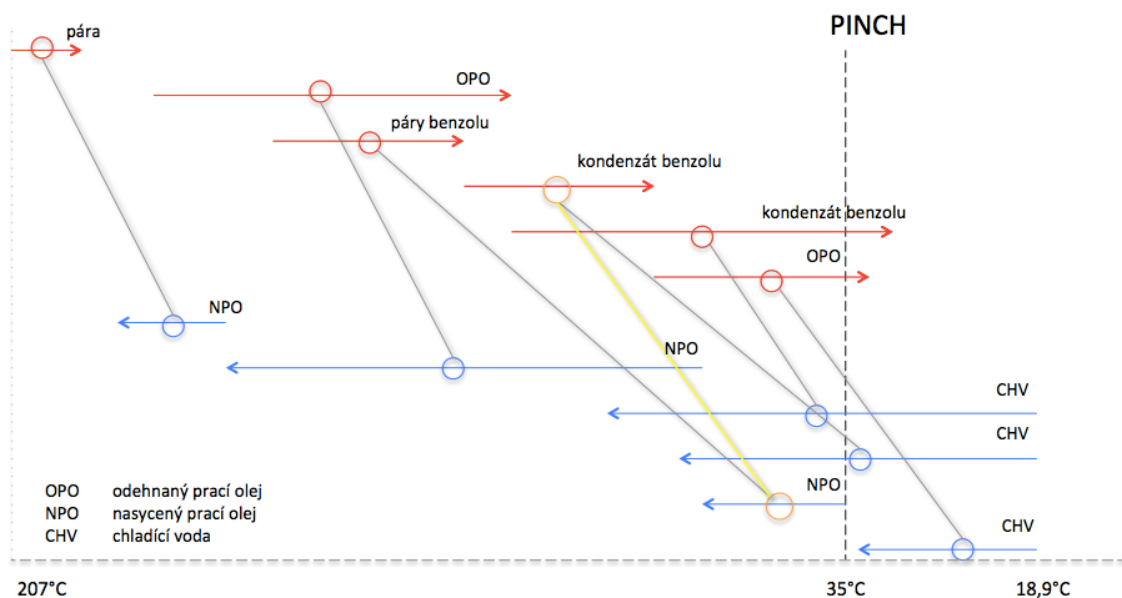


Obr. 11 Graf tepelných průtoků v závislosti teploty na entalpii

Modrá křivka představuje tepelné průtoky studených proudů, tj. chladicí vody a nasyceného pracího oleje. Červená křivka pak tepelné průtoky horkých proudů, tj. nasyceného a odehnaného pracího oleje a vysokotlaké páry. Podle umístění bodu pinch lze odhadnout místo energetických úspor, v našem případě odpovídá chladiči par.

3.4 Sestavení síťového diagramu

Na následujícím obrázku Obr. 12 je možné vidět sestavení síťového diagramu pro benzolku. Šedou barvou jsou spojeny proudy již s existující výměnou tepla. Žlutou barvou jsou pak spojeny proudy naznačující možnou výměnu tepla, v našem případě mezi proudem kondenzátu benzolu a nasyceným pracím olejem.



Obr. 12 Síťový diagram benzolky

4 Výsledky a diskuse

4.1 Návrh řešení úspor energie

Z předchozích kroků vyplývá, že optimální místo pro možné energetické úspory na benzolce je chladič par surového benzolu, který zároveň slouží jako predehřivač nasyceného pracího oleje. V současném uspořádání je nasycený prací olej přiváděn do trubkovnice prvního válce chladiče a poté odchází do dalších výměníků. Ve druhém a třetím válci chladiče se využívá jako chladící médium užitková voda.

V úvahu přichází lepší využití tepla par kondenzujícího surového benzolu ke zvýšení teploty nasyceného pracího oleje. Technicky schůdné jsou dvě varianty. První z nich je rozdělení průtoku nasyceného pracího oleje paralelně do prvního a druhého válce chladiče par. Při tomto uspořádání však dojde k výraznému snížení rychlosti proudění nasyceného pracího oleje, což v důsledku vede k výraznému zhoršení koeficientu přestupu tepla mezi stěnou trubek a nasyceným pracím olejem.

Jako vhodnější varianta se ukazuje zapojení prvního a druhého válce do série za sebe. Ve třetím válci by se surový benzol dochlazoval vodou, jako dosud. V dalším textu bude tato varianta blíže rozvedena.

4.2 Výpočet úspory

Při zapojení prvního a druhého válce do série by se zvýšila výstupní teplota nasyceného pracovního oleje z druhého válce a tím i jeho výstupní teplota z Wolfových výměníků. Díky tomu by se mohlo snížit množství potřebné páry v parních předehřívácích. Její množství se dá vypočítat podle následujících kroků. [17, 18]

4.2.1 Vstupní data

Tabulka 5 Tabulka vstupních údajů pro výpočet úspory na parních ohřívácích

vnitřní průměr trubek	$d = 0,033 \text{ m}$
průtok NPO	$\dot{m}_{NPO} = 2,55 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{s}$
počet trubek ve výměnících	$n = 336$
počet průchodů	$m = 4$
hustota NPO	$\rho_{NPO} = 1023,35 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$
tepelná kapacita NPO při $t=40^\circ\text{C}$	$c_{p\text{ NPO}} = 1511,74 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
dynamická viskozita NPO	$\mu_{NPO} = 2,77 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
tepelná vodivost NPO	$\lambda_{NPO} = 0,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
tepelná vodivost kondenzátu	$\lambda_{kon} = 0,66 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
hustota kondenzátu	$\rho_{kon} = 928,39 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$
dynamická viskozita kondenzátu	$\mu_{NPO} = 0,31 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
výparné teplo	$\Delta h_{vyp} = 1161720 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
délka trubek	$l = 2,8 \text{ m}$
teplota stěny	$t_{stěny} = 59^\circ\text{C}$
tepelná vodivost stěny	$\lambda_{kon} = 47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
tloušťka stěny	$\delta = 0,0025 \text{ m}$
teplosměnná plocha	$A = 110 \text{ m}^2$
tepelná kapacita NPO při $t=90^\circ\text{C}$	$c_{p\text{ NPO}} = 1662,7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
tepelná kapacita OPO	$c_{p\text{ OPO}} = 1756,4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
tepelná kapacita NPO při $t=140^\circ\text{C}$	$c_{p\text{ NPO}} = 1876,6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
výparné teplo	$\Delta h_{vyp\text{ pára}} = 1911386,3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

4.2.2 Výpočet plochy jedné trubky chladiče

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,033^2}{4} = 8,55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (20)$$

4.2.3 Výpočet průtoku NPO v jedné trubce chladiče

$$\dot{m}_{NPO} = \frac{4 \cdot \dot{m}_{NPO}}{n} = \frac{4 \cdot 2,55 \cdot 10^{-2}}{336} = 3,04 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s} \quad (21)$$

4.2.4 Výpočet rychlosti NPO v jedné trubce chladiče

$$v_{NPO} = \frac{\dot{m}_{NPO}}{S} = \frac{3,04 \cdot 10^{-4}}{8,55 \cdot 10^{-4}} = 0,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (22)$$

4.2.5 Výpočet Reynoldsova čísla

$$RE = \frac{v_{NPO} \cdot d \cdot \rho_{NPO}}{\mu_{NPO}} = \frac{0,36 \cdot 0,033 \cdot 1023,35}{2,77 \cdot 10^{-3}} = 4388,6 \quad (23)$$

4.2.6 Výpočet Prantlova čísla

$$Pr = \frac{c_{p\ NPO} \cdot \mu_{NPO}}{\lambda_{NPO}} = \frac{1511,74 \cdot 2,77 \cdot 10^{-3}}{0,14} = 29,91 \quad (24)$$

4.2.7 Výpočet Nuseltova čísla

$$NU = 0,023 \cdot RE^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,023 \cdot 4388,6^{0,8} \cdot 29,91^{0,4} = 73,44 \quad (25)$$

4.2.8 Výpočet koeficientu přestupu tepla mezi stěnou a NPO

$$\alpha_{NPO} = \frac{NU \cdot \lambda_{NPO}}{d} = \frac{73,44 \cdot 0,14}{0,033} = 311,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (26)$$

4.2.9 Výpočet koeficientu přestupu tepla na straně kondenzujících par benzolu

$$\alpha_{kon} = 1,15 \cdot \left(\frac{\lambda_{kon}^3 \cdot \rho_{kon}^2 \cdot g \cdot \Delta h_{výp}}{l \cdot \mu_{kon} \cdot (t_{par} - t_{stěna})} \right)^{0,25} \quad (27)$$

$$\alpha_{kon} = 1,15 \cdot \left(\frac{0,66^3 \cdot 928,39^2 \cdot 9,81 \cdot 1161720}{2,8 \cdot 0,31 \cdot 10^{-3} \cdot (93,3 - 59)} \right)^{0,25} = 3588,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.2.10 Výpočet koeficientu prostupu tepla v chladiči

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{NPO}} + \frac{\delta}{\lambda_{stěny}} + \frac{1}{\alpha_{kon}}} \quad (28)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{311,6} + \frac{0,0025}{47} + \frac{1}{3588,9}} = 282,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.2.11 Výpočet výstupní teploty NPO z druhého válce

$$\dot{m}_{NPO} \cdot c_{p\ NPO} \cdot (t_{vst\ NPO} - t_{vys\ NPO}) = K \cdot A \cdot \frac{(t_{vst\ kon} - t_{vys\ NPO}) - (t_{vys\ kon} - t_{vst\ NPO})}{\ln \frac{(t_{vst\ kon} - t_{vys\ NPO})}{(t_{vys\ kon} - t_{vst\ NPO})}} \quad (29)$$

$$26,2 \cdot 1511,74 \cdot (59,5 - t_{vys\ NPO}) = 282,4 \cdot 110 \cdot \frac{(82,2 - t_{vys\ NPO}) - (82,2 - 59,2)}{\ln \frac{(82,2 - t_{vys\ NPO})}{(82,2 - 59,2)}}$$

$$t_{vys\ NPO} = 71^{\circ}\text{C}$$

4.2.12 Výpočet výstupní teploty NPO z Wolfových výměníků

$$t_{vys\ NPO} = \frac{\dot{m}_{OPO} \cdot c_{p\ OPO} \cdot (t_{vst\ OPO} - t_{vys\ OPO})}{\dot{m}_{NPO} \cdot c_{p\ NPO}} + t_{vst\ NPO} \quad (30)$$

$$t_{vys\ NPO} = \frac{24,36 \cdot 1756,4 \cdot (147 - 83,9)}{25,37 \cdot 1662,7} + 71 = 135^{\circ}\text{C}$$

4.2.13 Výpočet množství topné páry do parních předehříváčů

$$\dot{m}_{pára} = \frac{c_{p\ NPO} \cdot \dot{m}_{NPO} \cdot (t_{vys\ NPO} - t_{vst\ NPO})}{\Delta h_{výp\ pára}} \quad (31)$$

$$\dot{m}_{pára} = \frac{1876,6 \cdot 24,23 \cdot (160,8 - 135)}{1911386,3} = 0,61\ \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} = 2,2\ \text{t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Množství páry, které je potřeba přivádět na parní předehříváče je 2,2 t.h⁻¹.
V současné době je to 4,86 t.h⁻¹.

Ukazuje se, že zapojením prvního a druhého válce do série a jejich využití pro předehřev NPO přináší nezanedbatelnou úsporu topné páry v provozu.

5 Závěr

Ve své bakalářské práci jsem se zabývala provedením pinch analýzy v provozu koksochemie, konkrétně v jedné z jejích specifických částí, a to v benzolce.

Benzolka je vzhledem k množství tepelných výměníků a k množství proudů ideálním místem pro hledání energetických úspor. Z kombinace hlavních složených křivek se ukázalo, že nejefektivnější úspora by mohla být na chladiči par kondenzujícího surového benzolu. V úvahu přicházely dvě varianty. Rozdělit proud nasyceného pracího oleje do prvního a druhého válce chladiče par paralelně. Avšak by se snížila rychlost nasyceného pracího oleje a následně by se výrazně snížil koeficient přestupu tepla. Tento návrh řešení by tedy očekávané výsledky nepřinesl. Druhou, vhodnější variantou, by bylo zapojení prvního a druhého válce chladiče par do série. Zvýšila by se tímto výstupní teplota nasyceného oleje z chladiče par, tím i výstupní teplota oleje z Wolfových výměníků a tím by se snížilo množství páry přiváděné na parní předehříváče. Konkrétně by se jednalo o úsporu 2,66 tun/hodinu, (23 300 tun/rok) což při současně ceně páry 465 Kč/tunu by činilo více než 10 milionů korun ročně. Současně by se ušetřilo množství chladicí vody přiváděné na chladiče par.

Úspora páry má dopad i na životní prostředí. Jelikož se pára vyrábí konvenčním způsobem, tedy spalováním fosilních paliv, došlo by ke snížení množství emisí znečišťujících látek, zejména oxidu uhličitého, oxidu siřičitého a oxidů dusíku.

6 Použitá literatura

- [1] *Pinch analysis, for the efficient use of energy, water* [online]. Varennes, Québec: Natural Resources Canada, 2009 [cit. 2015-04-19]. ISBN 9781100198200.
- [2] SAHDEV, Mukesh. Pinch technology: Basics for the beginners. In: *www.cheresources.com* [online]. 2008 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.cheresources.com/content/articles/heat-transfer/pinch-technology-basics-for-beginnerst>
- [3] LINNHOFF, B. Pinch analysis: a state of the art overview. *Chemical engineering research: transactions of the Institution of Chemical Engineers* [online]. 1993, č. 71 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=3748729>
- [4] LEE, Sunggyu. *Encyclopedia of chemical processing*. New York: Taylor, c2006, 5 v. ISBN 082475560X5.
- [5] Linnhoff, B., Eastwood, A.R. Overall site optimisation by pinch technology. *CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH & DESIGN*, Vol. 75, Supplement: S, str: 138-S144
- [6] PERRY, Robert H a Don W GREEN. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8th ed. /. New York: McGraw-Hill, c2008, 1 v. (various pagings). ISBN 9780071422949.
- [7] DIMIAN, Alexandre C. *Integrated design and simulation of chemical processes*. 1st ed. Boston: Elsevier, 2003, xvi, 698 p. ISBN 0444829962.
- [8] DOBROVSKÁ, Jana. *FYZIKÁLNÍ CHEMIE: 1.část: Základy chemické termodynamiky*. Ostrava, 2008, 82 s.
- [9] WICHTERLE, Kamil a Marek VEČEŘ. *Základy procesního inženýrství*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2580-9.
- [10] DVOŘÁK, Zdeněk. *Výměníky tepla: (pro hydraulické a pneumatické stroje)*. Vyd. 3. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992, 121 s. ISBN 80-010-0808-8.
- [11] BEJAN, Adrian a Allan D KRAUS. *Heat transfer handbook*. New York: J. Wiley, 2003, xiv, 1477 p. ISBN 0471390151.
- [12] PÍŠA, Miroslav. *Koksárenství: Hutnické minimum*. Praha, 1963.
- [13] CHARVÁT, Vladimír. *Koksárenství: Díl II*. Praha, 1977, 126 s.
- [14] KOZINA, Antonín, Miroslav PÍŠA a Bohumil ŠPLÍCHAL. *Koksárenství: učebnice pro vysoké školy*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1973, 473 s.
- [15] HUSÁR, . 2011. *Odsíření koksárenského plynu: DTP - 10.4801*.

- [16] ШВАРЦ, С.А. а Л.В. МЕЙКСОН. *Справочник коксохимика*. Москва: издательство металлургия, 1965.
- [17] ŠNITA, Dalimil. *Příklady a úlohy z chemického inženýrství I*. 2. přepr.vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2002, Přer.str. ISBN 80-7080-489-0.
- [18] PŘÍHODA, Miroslav a Miroslav RÉDR. *Sdílení tepla a proudění*. 2., přeprac. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 177 s. ISBN 978-80-248-1748-4.

7 Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Popis	Jednotka
T	termodynamická teplota	[K]
t	teplota	[°C]
\dot{m}_{hm}	hmotnostní průtok	[kg · s ⁻¹]
\dot{m}_{obj}	objemový průtok	[m ³ · s ⁻¹]
cp	specifická tepelná kapacita	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
CP	rychlost změny tepelné kapacity	[kW · K ⁻¹]
ΔH	změna entalpie	[J · kg ⁻¹]
\dot{Q}	tepelný výkon	[W]
Q	teplo	[J]
K	koeficient prostupu tepla	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
$\Delta t_{stř}$	logaritmická střední hodnota	[K]
V^s	obsah prchavé látky v suchém uhlí	[%]
V^r	obsah prchavé látky v mokřém uhlí	[%]
A^s	obsah popela v suchém uhlí	[%]
A^r	obsah popela v mokřém uhlí	[%]
V^b	obsah prchavé látky v bezpopelové a bezvodé vsázce	[%]
V_k^s	obsah prchavé látky v suchém koksu	[%]
S_w^r	obsah síry v mokřé vsázce	[%]
S_c^r	obsah síry v suché vsázce	[%]
w^r	vlhkost vsázkového uhlí	[%]
w^w	omnožství vody v uhlí	[%]
m_u	hmotnost mokřého uhlí	[kg]
m_u^s	hmotnost suchého uhlí	[kg]
K^s	výtěžek suchého netříděného koksu	[kg]
G_{dh}	výtěžek dehtu	[kg]
G_{benz}	výtěžek benzolu	[kg]
G_{NH_3}	výtěžek amoniaku	[kg]
G_g	výtěžek čistého surového plynu	[kg]
G_s	výtěžek síry	[kg]
W_s	množství celkové vlhkosti	[kg]
$\Delta h_{výp}$	výparné teplo	[J · kg ⁻¹]
ρ	hustota	[kg · m ³]
μ	dynamická viskozita	[Pa · s]
λ	tepelná vodivost	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
α	koeficient přestupu tepla	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
A	teplosměnná plocha	[m ²]
δ	tloušťka stěny	[m]
NU	Nuseltovo číslo	
RE	Reynoldsovo číslo	
Pr	Prantlovo číslo	

Seznam zkratk

NPO	nasycený prací olej
OPO	odehnaný prací olej
CHV	chladící voda
VP	vysokotlaká pára

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Srovnání klasické metody návrhu procesu a metody založené na pinch technologii	3
Obr. 2 Schéma jednoduchého technologického procesu	4
Obr. 3 Sestavení horké složené křivky.	6
Obr. 4 Sestavení studené složené křivky.	6
Obr. 5 Graf kombinace horké a studené křivky.	7
Obr. 6 Kaskáda teplotních a tepelných intervalů. a) Kaskáda bez tepelného vstupu. b) Kaskáda s přidaným teplem z okolních užitečných systémů.	9
Obr. 7 Hlavní složená křivka.	10
Obr. 8 Příklady použití hlavní složené křivky	11
Obr. 9 Síťový diagram.	12
Obr. 10 Schéma benzolky	25
Obr. 11 Graf tepelných průtoků v závislosti teploty na entalpii	27
Obr. 12 Síťový diagram benzolky	28
Obr. 13 Benzolka	38
Obr. 14 Wolfovy chladiče	38

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 Tabulka s daty nezbytnými pro pinch analýzu	5
Tabulka 2 Teplotní intervaly energetické bilance	8
Tabulka 3 Shrnutí s údaji materiálové bilance koksování [13]	24
Tabulka 4 Tabulka naměřených a vypočtených dat z benzolky	26
Tabulka 5 Tabulka vstupních údajů pro výpočet úspory na parních ohřivačích	29

10 Přílohy

Seznam použitých termínů

Vstupní teplota (T_s) – teplota, při které je procesní proud dostupný, je před ohřátím i ochlazením.

Výstupní teplota (T_t) – teplota, na kterou má být proud ohřát či ochlazen.

Rychlost změny tepelné kapacity (CP) - také někdy nazývaná pouze tepelná kapacita, je to hmotnostní průtok proudy vynásobený jeho tepelnou kapacitou.

Tepelné zatížení (ΔH) - množství změny entalpie procesního proudy a také maximum množství tepla přeneseného z nebo do daného proudy.

Složená křivka – soubor jednotlivých hodnot vynesných do grafu závislosti teploty na entalpii (T-H diagram), poskytující jednotnou křivku. Složená křivka poskytuje vizuální profil dostupného chlazení a ohřevu procesních proudů.

ΔT_{\min} – na kombinované složené křivce je to minimální vzdálenost mezi teplou a studenou křivkou na ose teploty.

Pinch teplota – teplota, při níž schopnost přenosu tepla mezi procesními proudy je nejvíce omezena. Je ovlivněná zvolenou hodnotou ΔT_{\min} a je snadno získatelná na hlavní složené křivce tam, kde se entalpie rovná nule.

Kombinovaná složená křivka – graf, ve kterém je zobrazena teplá i studená složená křivka. Oblasti, kde se křivky nepřekrývají, ukazují minimální požadavky na užité proudy, odečitatelné zejména na ose entalpie. Tento graf snadno zobrazuje, zda zvolená hodnota ΔT_{\min} má minimální požadavky na chlazení a ohřev z okolních proudů.

Hlavní složená křivka – graf zobrazující celkové kolísání dodávek a uvolnění tepla v celém procesu. Z této křivky lze nejlépe vyčíst hodnotu pinch teploty a také minimální množství tepla na chlazení a ohřev z okolních užitných proudů.

Okolní užité proudy – jsou zdroje ohřevu nebo chlazení, které nepochází z toku procesu. Cílem pinch analýzy je tyto proudy co možná nejvíce eliminovat.



Obr. 13 Benzolka



Obr. 14 Wolfovy chladiče